第47卷　第2期
2024年2月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 47　No. 2
Feb. 2024

基于PLUS-InVEST模型吐哈盆地陆地生态系统碳储量时空变化及多情景模拟

韩楚翘[1]，　郑江华[1,2]，　王　哲[1]，　于雯婕[1]

（1. 新疆大学地理与遥感科学学院，新疆 乌鲁木齐　830017；
2. 新疆绿洲生态重点实验室，新疆 乌鲁木齐　830017）

摘　要： 土地覆盖变化能够改变区域碳储存能力，从而引起全球气候变化。研究土地覆盖变化对碳储量的影响，预测未来不同土地覆盖情景下的碳储量，对实现区域"碳中和"战略目标具有重要意义，然而目前针对中国西部生态脆弱区的研究仍有待探究。以新疆吐哈盆地为研究区，基于土地覆盖产品数据，结合PLUS模型和InVEST模型，探讨了土地覆盖变化与区域碳储量的时空变化关系，预测和评估了2025、2030年可持续发展情景，维持现状发展情景，经济优先发展情景下土地覆盖和碳储量的时空动态特征。结果表明：(1) 近20 a来，吐哈盆地耕地和裸土地面积增加最大，其次是建设用地，而草地表现出最大的减少趋势，草地转为耕地和建设用地是最主要的转移类型。(2) 2000、2010年和2020年吐哈盆地平均碳储量分别为26.01 t·hm^{-2}、25.68 t·hm^{-2}、25.73 t·hm^{-2}，呈现出先降低后增加的趋势，平均碳储量累计减少了0.28 t·hm^{-2}，其中土壤有机质碳储量占比最高，约占总碳储量的94%，裸土地、草地贡献了最多的碳储量。(3) 2030年3种情景下，森林、灌木林、湿地几乎无明显变化，裸土地呈现出减少的趋势，而建设用地呈现增加的趋势。(4) 到2030年可持续发展情景下吐哈盆地总碳储量较2020年增加了0.18×10^6 t，维持现状发展情景和经济优先发展情景下分别减少了0.30×10^6 t、1.01×10^6 t，经济优先发展情景下碳储量损失最大。研究结果可为吐哈盆地土地利用优化以及制定生态系统可持续发展措施提供依据。

关 键 词： 土地覆盖变化；情景模拟；碳储量；吐哈盆地

文章编号： 1000－6060(2024)02－0260－10(0260～0269)

陆地生态系统中的碳储量在全球碳循环中具有重要意义，在减缓气候变化，实现"碳中和"战略目标等方面起着关键作用[1]，它能够从大气中吸收CO_2，以增加生态系统碳储量和缓解气候变暖，是全球碳循环中重要一步[2]。土地利用/土地覆盖变化是人类改变陆地生态系统最主要的方式[3]，有研究表明，土地覆盖变化是区域碳储量变化的重要原因，不同土地利用类型之间的碳储存能力差异较大[4-5]。此外，土地覆盖变化也会引起植被分布及土壤类型发生改变，从而导致碳储量的变化[6-7]。在全球气候变化大背景下，评估土地覆盖变化对碳储量的影响对于可持续碳循环和实现"双碳"目标至关重要。

构建土地利用覆盖模型是了解土地覆盖变化研究的主要方法[8]。现有的土地利用模型如CA-Markov[9]、FLUS[10]和CLUE-S[11]等模型难以确定土地利用变化的潜在驱动因素，而斑块生成土地利用变化模拟（PLUS）模型可以深入挖掘土地覆盖变化驱动因素，从而获得更准确的土地覆盖模拟结果[12-14]。可靠的土地利用预测模型，将有助于制定科学合理的土地管理政策。

目前，国内外研究学者估算生态系统碳储量的

收稿日期： 2023-02-17；　**修订日期：** 2023-04-05
基金项目： 吐哈盆地水资源调查和承载力评估——吐哈盆地地表水文水资源要素调查项目(2021xjkk1001)资助
作者简介： 韩楚翘(1994-)，男，博士研究生，主要从事地图学与地理信息系统研究. E-mail: hanchuqiao@stu.xju.edu.cn
通讯作者： 郑江华(1973-)，男，博士，教授、博士生导师，主要从事遥感与地理信息系统应用研究. E-mail: zheng.jianghua@xju.edu.cn

方法主要有2种，一是基于不同土地覆盖类型碳密度，利用生态系统服务和权衡的综合评估(InVEST)模型得到；二是通过实地调查获得。虽然实地测算得到的结果精度较可靠，但需要大量的人力物力，且适用于小范围的研究[15]。InVEST模型具有输入参数简单、可视性强、稳定性高等优点[16-17]，其应用相对广泛。Wang等[18]利用InVEST模型评估了区域碳储量的时空趋势及驱动因素，对未来制定土地利用和碳管理政策具有指导意义；Li等[19]、Zhu等[20]、姚楠等[21]探究了不同生态工程对陆地生态系统碳储量的影响；段璇瑜等[22]、刘洋等[23]、王渊刚等[24]、Zhu等[25]结合InVEST模型评估了不同区域土地覆盖变化对碳储量的影响。综上所述，现有的研究更多地讨论了历史时期土地覆盖变化对碳储量的影响，而对于不同情景下未来区域碳储量变化情况的研究较为缺乏，尤其是中国西部的生态脆弱区。

本研究以新疆"三基地一通道"重点建设区吐哈盆地为例，基于土地覆盖数据，同时考虑自然、社会经济、交通等因素的影响，耦合PLUS模型和InVEST模型，分析了2000—2020年吐哈盆地土地覆盖变化，探讨了土地覆盖变化对碳储量的影响。此外，研究设置了3种发展情景，预测了2025、2030年不同情景下土地覆盖和碳储量的时空变化。结果可为区域绿色低碳发展和土地可持续管理提供参考依据。

1　数据与方法

1.1　研究区概况

吐哈盆地位于新疆东部(87°16′~96°23′E，40°52′~45°05′N)(图1)，由吐鲁番盆地和哈密盆地两部分组成，面积约为21×10⁴ km²，占新疆总面积的

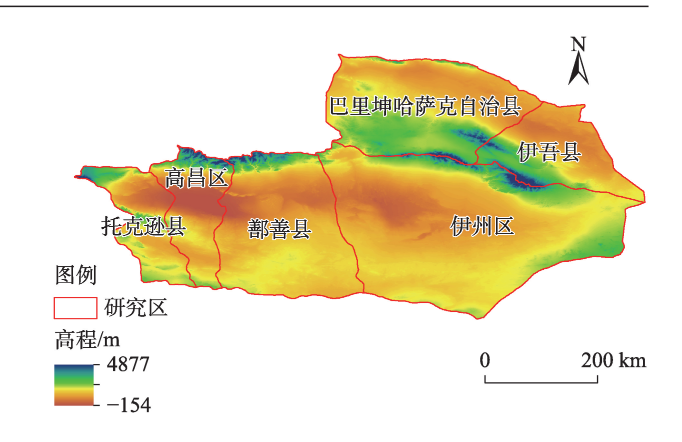


图1　研究区示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the study area

12.6%，包括高昌区、鄯善县、托克逊县、伊州区、巴里坤哈萨克自治县和伊吾县6个区县。该地属于典型的大陆性干旱气候，昼夜温差大，降水少且蒸发强烈，年平均降水量约为10~30 mm，年平均蒸发量约为3000~4000 mm，大风、高温等极端气候事件频发，生态环境极为脆弱。

1.2　数据来源

本研究使用的2000、2005、2010、2015年和2020年30 m空间分辨率的土地利用数据来源于中国年度土地覆盖数据集，该数据集基于Landsat制作，并与全球森林变化、全球地表水以及不透水面产品数据表现出良好的一致性[26]，是中国较可靠的土地利用数据源之一。根据研究区实际情况将数据重新分为8类：耕地、森林、灌木林、草地、水体、裸土地、建设用地、湿地。

研究选取了4种类型数据作为影响土地利用变化的驱动因素，包括地形数据(DEM、坡度)、气象数据(气温、降水量)、路网数据(与道路的距离)、社会经济数据(GDP、人口)，各数据来源详见表1。

表1　数据类型及来源

Tab. 1　Data types and sources

数据		类型	分辨率	来源
土地利用数据		栅格	30 m	中国年度土地覆盖数据集(https://zenodo.org/record/5210928#collapseCitations)
地形数据	DEM	栅格	30 m	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn)
	坡度	栅格	30 m	基于DEM数据得到
气象数据	年平均气温	栅格	1 km	资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)
	年平均降水量	栅格	1 km	资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)
路网数据	与道路的距离	栅格	30 m	OpenStreetMap(https://www.openstreetmap.org/)，利用ArcGIS的欧氏距离计算得到
社会经济数据	GDP	栅格	1 km	资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)
	人口	栅格	1 km	资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)

1.3 研究方法

1.3.1 PLUS模型土地利用变化模拟 PLUS模型是由中国地质大学开发的斑块级土地利用模拟模型，它包含2个模块：土地扩张分析策略(LEAS)模型和基于多类型随机种子(CARS)的CA模型[27]。PLUS模型能够确定土地扩张过程的驱动因素，同时有着较高的模拟精度，与其他模型相比有一定的优势。

LEAS模块中需要输入两期土地利用数据，利用随机森林算法计算驱动要素对各土地利用类型扩张的影响，以确定区域不同类型土地的发展潜力。CARS模块是CA模型，它是基于LEAS结果进行的，能够模拟局部土地利用竞争，使土地利用总量在更大尺度上根据自适应系数、邻里效应和发展概率满足未来需求[28]。

研究使用总体精度(OA)，Kappa系数以评估PLUS模型的模拟性能[29]，Kappa系数可以揭示建模过程的准确性，一般来说，当Kappa系数大于0.8时，说明一致性较好，模拟结果被认为是可靠的。其公式如下：

$$\text{Kappa} = (P_o - P_c)/(P_p - P_c) \tag{1}$$

式中：Kappa为模拟精度指标；P_o为实际模拟精度；P_c为随机状态下预期模拟精度；P_p为理想模拟精度(100%)。通过模拟得到2010年和2020年的Kappa系数分别为0.88和0.89，均大于0.8，且总体精度分别为0.96和0.97，说明PLUS模型能够较好的模拟吐哈盆地土地覆盖情况，可用于未来的土地覆盖模拟。

1.3.2 碳储量估算 InVEST模型即生态系统服务和权衡的综合评估模型[30]，它包含一系列子模型，其中碳储存和碳封存模型用于评估陆地生态系统的碳储量[31-32]。该模块包含4种类型的碳库：地上生物量碳储量、地下生物量碳储量、土壤碳储量、死亡有机质碳储量。具体计算公式如下：

$$C_i = C_{i\text{-above}} + C_{i\text{-below}} + C_{i\text{-soil}} + C_{i\text{-dead}} \tag{2}$$

$$C_{\text{total}} = \sum_{i=1}^{n} C_i \times A_i \tag{3}$$

式中：i为土地覆盖类型；C_i为第i种土地覆盖类型的碳密度；$C_{i\text{-above}}$为第i种土地覆盖类型的地上生物量碳密度；$C_{i\text{-below}}$为第i种土地覆盖类型的地下生物量碳密度；$C_{i\text{-soil}}$为第i种土地覆盖类型的土壤有机质碳密度；$C_{i\text{-dead}}$为第i种土地覆盖类型的死亡有机质碳储量；C_{total}为陆地生态系统总碳储量；A_i为第i种土地覆盖类型的面积。由于死亡有机质碳储量含量较低且数据难以获取[33-34]，因此本研究仅考虑了3个碳库。

1.3.3 碳密度的确定与修正 研究区各土地覆盖类型的碳密度数据来源首选与本地相关或相近的实测数据，其次为临近区域研究成果[23,35-40]，并利用气温、降水量与碳密度的关系模型进行修正[41-42]，具体修正公式如下：

$$C_{BP} = 6.789 \times e^{0.0054 \times \text{MAP}} \tag{4}$$

$$C_{BT} = 28 \times \text{MAT} + 398 \tag{5}$$

$$C_{SP} = 3.3968 \times \text{MAP} + 3996.1 \tag{6}$$

$$K_B = \frac{C_{1BP}}{C_{2BP}} \times \frac{C_{1BT}}{C_{2BT}} \tag{7}$$

$$K_S = \frac{C_{1SP}}{C_{2SP}} \tag{8}$$

式中：C_{BP}为基于年平均降水量修正后得到的生物量碳密度；C_{BT}为基于年平均气温修正后得到的生物量碳密度；C_{SP}为基于年平均降水量修正后得到的土壤碳密度；MAP和MAT分别为年平均降水量(mm)和年平均气温(℃)；C_{1BP}和C_{2BP}分别为吐哈盆地和全国基于年平均降水量修正后的生物量碳密度；C_{1BT}和C_{2BT}分别为吐哈盆地和全国根据年平均气温修正后的生物量碳密度；K_B和K_S分别为生物量碳密度和土壤碳密度的修正系数；C_{1SP}和C_{2SP}分别为吐哈盆地和全国根据年平均降水量修正后的土壤碳密度。修正后吐哈盆地不同土地覆盖类型碳库碳密度见表2。

表2 吐哈盆地不同土地覆盖类型碳库碳密度

Tab. 2 Carbon density of different land cover types of carbon pools in the Turpan-Hami Basin /t·hm^{-2}

土地覆盖类型	C_{above}	C_{below}	C_{soil}	C_{dead}	C_{total}
耕地	2.87	3.41	87.47	0.00	93.75
森林	30.58	9.03	123.11	0.00	162.71
灌木林	4.34	2.85	72.90	0.00	80.09
草地	0.48	4.24	86.25	0.00	90.98
水体	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
裸土地	0.45	0.44	15.55	0.00	16.44
建设用地	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
湿地	1.83	1.46	242.84	0.00	246.14

注：C_{above}为地上生物量碳密度；C_{below}为地下生物量碳密度；C_{soil}为土壤有机质碳密度；C_{dead}为死亡有机质碳储量；C_{total}为陆地生态系统总碳储量。

1.3.4　情景设置　基于不同的社会经济发展目标与区域土地利用政策偏好，设定并模拟了3种发展情景[43-44]：可持续发展情景、维持现状情景、经济优先发展情景。3种情景代表研究区未来主要发展方向。

可持续发展情景：该情景下要加强生态保护，减缓经济增长，限制森林、草地、湿地向其他土地类型发生转变。

维持现状情景：该情景被视为基准情景，它保持了土地利用历史发展趋势，并按照此趋势对未来土地利用情况进行模拟。

经济优先发展情景：该情景主要以经济增长为主，忽视了资源与环境的保护。因此限制建设用地转化为其他土地类型，同时增加其他土地利用类型转化为建设用地的概率。

2　结果与分析

2.1　土地覆盖与碳储量时空变化特征

2000—2020年土地覆盖空间分布如图2所示，裸土地是研究区主要的土地覆盖类型，占总面积的85%以上，遍布全区。第2大土地覆盖类型为草地，占总面积的11%，主要分布在研究区中部。水体和森林分别占总面积的0.21%和0.19%，分布在海拔较高的中部及西部。建设用地主要分布在各县区的中部，占研究区的0.1%~0.2%。耕地呈块状分布在建设用地及坡度较缓的水源附近。其余2种土地覆盖类型为灌木林和湿地，面积总计32 hm^2。20 a来，耕地和裸土地面积分别增长了64.3×10^3 hm^2和65.7×10^3 hm^2，其次面积增长最大是建设用地，从2000年的17.1×10^3 hm^2增长到2020年的40.1×10^3 hm^2，草地表现出最大的减少趋势，共减少了156.2×10^3 hm^2。

2000、2010年和2020年吐哈盆地平均碳储量分别为26.01 t·hm^{-2}、25.68 t·hm^{-2}、25.73 t·hm^{-2}，呈现出先降低后增加的趋势，20 a来平均碳储量减少了0.28 t·hm^{-2}。从空间分布看(图3)，吐哈盆地碳储量中值区分布遍布全区，这些区域主要被裸土地覆盖；高值区集中在研究区的中部和西部，分布范围与耕地、森林、草地范围相一致；碳储量低值区主要分布在高值区附近，这些地区地势较平坦，土地类型多为水体和建设用地，受人类活动影响较大，碳储存能力相对较弱。

吐哈盆地不同土地覆盖类型对总碳储量的贡献度由大到小依次是：裸土地、草地、耕地、森林、湿地、灌木林(表3)。近年来，随着耕地、森林、裸土地面积的增加，碳储量也分别增加了6.03×10^6 t、1.23×10^6 t、1.08×10^6 t，而草地面积的减少导致14.21×10^6 t碳储量损失。总体来说，一部分碳密度较高的草地被建设用地侵占，另一部分草地退化为裸土地，区域生态系统逐渐恶化，是导致研究区总碳储量减少的主要原因。

此外，本研究分析了2000—2020年不同类型碳库的平均碳储量变化。研究发现，土壤有机质碳储量约占总碳储量的94%，并呈现出缓慢下降的趋势，由2000年的24.56 t·hm^{-2}减少到2020年的24.28 t·hm^{-2}，地下生物量碳储量同样呈现显著下降趋势，共减少了0.017 t·hm^{-2}，而地上生物量碳储量在20 a来呈现出上升趋势，增长了0.018 t·hm^{-2}，然而由于其占比较小(约2%)，因而对总碳储量的变化影响较小。

2000—2010年、2010—2020年碳储量空间变化

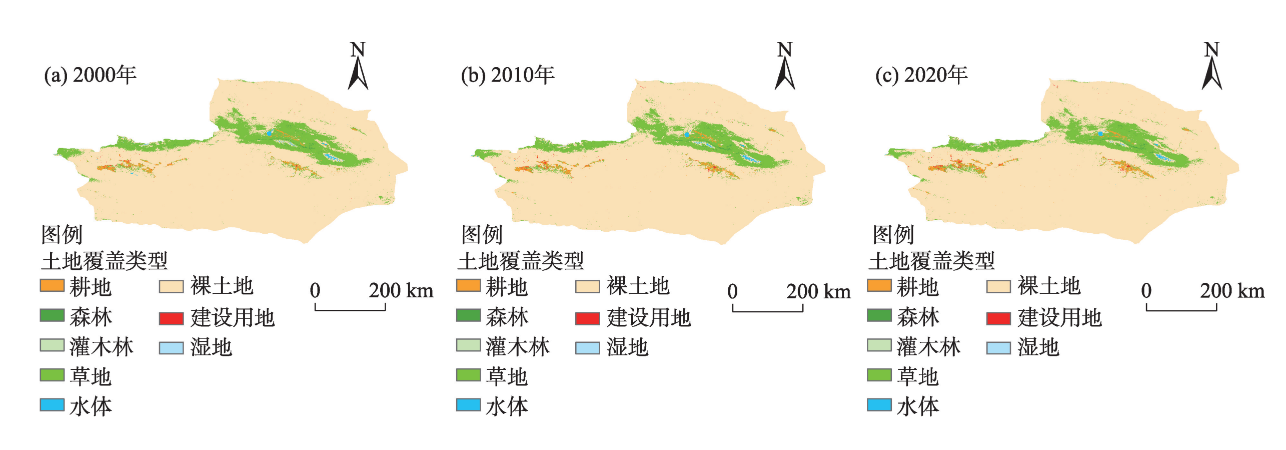


图2　2000—2020年土地覆盖空间分布

Fig. 2　Spatial distributions of land cover from 2000 to 2020

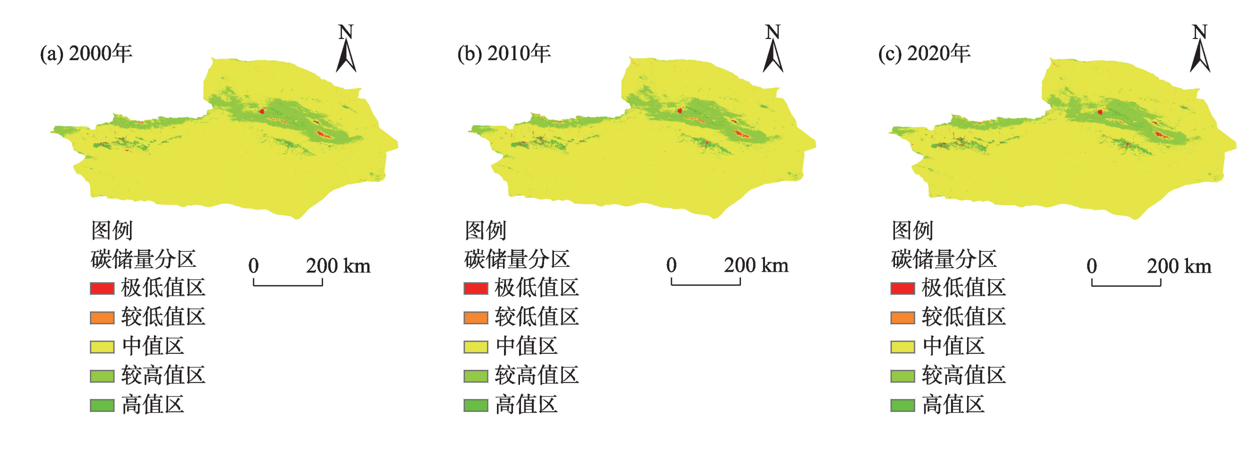


图3 2000—2020年碳储量空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of carbon storage from 2000 to 2020

表3 2000—2020年不同土地覆盖类型碳储量

Tab. 3 Carbon storage of different land cover types from 2000 to 2020 /10^6 t

土地覆盖类型	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年
耕地	17.7707	20.1326	22.4675	25.1001	23.7995
森林	5.8859	6.1228	6.3795	6.9071	7.1124
灌木林	0.0004	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
草地	222.0520	216.7252	208.6479	220.2085	207.8454
水体	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
裸土地	300.4230	300.8483	301.6903	298.9310	301.5034
建设用地	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
湿地	0.0054	0.0057	0.0055	0.0064	0.0068

显示,碳储量增加或减少的区域都存在着聚集和连片分布的特点(图4)。2000—2010年伊吾县、巴里坤哈萨克自治县碳储量存在着显著下降,这主要是由于大量草地退化为裸土地所导致的。其中伊州区和高昌区碳储量增加明显,这一时期区域人口不断增加,耕地扩张使土壤有机质碳储量增长,最终致使总碳储量的增加。2010—2020年随着耕地和草地面积的增加,碳储量增加的区域也在逐渐扩大,而伊吾县和巴里坤哈萨克自治县西部碳储量的降低依旧是由于草地退化所导致的。

2.2 未来不同情景下土地覆盖变化

运用PLUS模型模拟了研究区可持续发展情景,维持现状情景和经济优先发展情景下2025、2030年的土地覆盖。与2020年相比,2025年和2030年3种情景下森林、灌木林、湿地无明显变化,裸土地呈现减少的趋势,建设用地呈现增加的趋势(表4)。可持续发展情景下,耕地呈逐年减少的趋势,草地迅速增加,建设用地初期快速扩张而后又

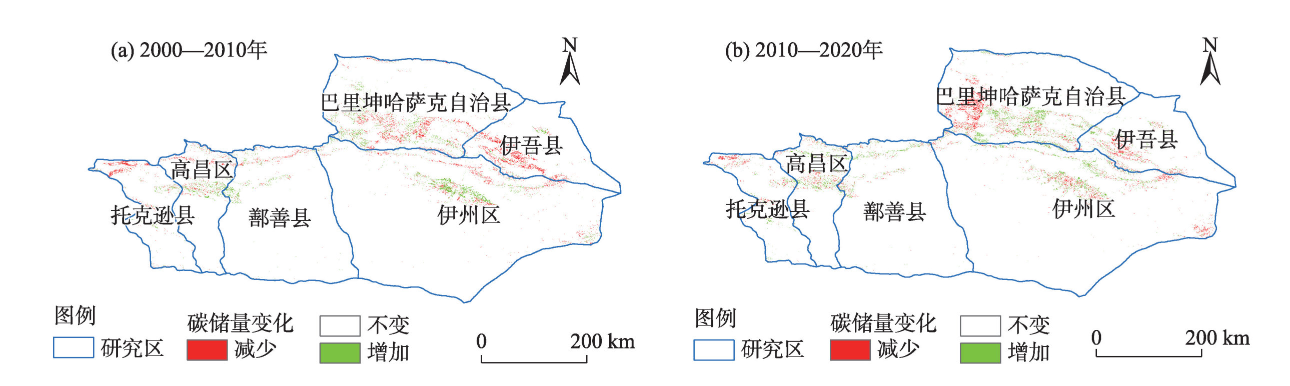


图4 2000—2020年碳储量空间变化

Fig. 4 Spatial changes of carbon storage from 2000 to 2020

下降。2030年耕地、草地、建设用地分别比2020年减少(增加)了23.23×10^3 hm^2、26.53×10^3 hm^2、0.33×10^3 hm^2。维持现状发展情景下,耕地、建设用地呈现增加趋势,草地有一定程度减少。与2020年相比,2030年耕地、建设用地、草地分别增加(减少)了19.03×10^3 hm^2、11.47×10^3 hm^2、29.62×10^3 hm^2,耕地与建设用地几乎全部由草地所转换。换句话说,在该情景下,人类活动将不断侵占城区附近的草地。经济优先发展情景下,建设用地、草地面积有一定的增加趋势,较2020年分别增加了12.50×10^3 hm^2、21.80×10^3 hm^2,耕地减少了29.61×10^3 hm^2。由于经济的快速发展,该区域对基础建设的需求不断增强,致使区域建设用地面积快速增加。与可持续发展和维持现状情景相比,该情景下建设用地面积达到最大。

2.3 不同情景下未来碳储量预测

研究估算了吐哈盆地3种情景2025年和2030年的碳储量(表5)。到2030年,除可持续发展情景较2020年总碳储量有所增加,其余2种情景均呈现减少趋势,其中可持续发展情景下吐哈盆地总碳储量增加了0.18×10^6 t,维持现状发展情景和经济优先发展情景下分别减少了0.30×10^6 t、1.01×10^6 t,经济优先发展情景下碳储量损失最大。可持续发展情景下,耕地碳储量呈现下降趋势,由2020年的23.80×10^6 t下降到21.62×10^6 t,而草地较2020年增加了2.41×10^6 t。这是由于人类实施的生态保护措施,使草地生态系统逐步恢复,部分裸土地向草地转换。维持现状发展情景下,耕地面积扩张使得耕地碳储量增加了1.78×10^6 t,但草地的减少也造成了2.69×10^6 t碳储量的损失。这是由于该区域农田开垦使得耕地面积增加所导致的,然而草地被建设用地侵占进而损失了更多的碳储量。总体来看,该情景下2030年碳储量增加量仍然小于减小量,区域固碳能力呈下降趋势。经济优先发展情景下,耕地面积持续减少,造成了2.78×10^6 t碳储量的损失,而草地面积的扩张弥补了1.98×10^6 t碳损失。由于经济

表4　不同情景下未来土地覆盖类型面积

Tab. 4　Area of land cover types in the future under different scenarios　/10^3 hm^2

土地覆盖类型	可持续发展情景		维持现状情景		经济优先发展情景	
	2025年	2030年	2025年	2030年	2025年	2030年
耕地	253.948	230.648	261.920	272.906	233.382	224.268
森林	43.719	43.731	45.871	47.852	42.731	42.722
灌木林	0.004	0.004	0.004	0.003	0.004	0.004
草地	2284.593	2311.071	2273.929	2254.925	2304.613	2306.341
水体	39.761	39.761	39.750	38.381	39.744	39.726
裸土地	18332.667	18334.358	18332.667	18334.358	18332.667	18334.358
建设用地	45.281	40.398	45.831	51.545	46.835	52.575
湿地	0.028	0.028	0.028	0.030	0.028	0.028

表5　各情景下不同土地覆盖类型碳储量

Tab. 5　Carbon storage of different land cover types under different scenarios　/10^6 t

土地覆盖类型	可持续发展情景		维持现状发展情景		经济优先发展情景	
	2025年	2030年	2025年	2030年	2025年	2030年
耕地	23.8065	21.6222	24.5539	25.5837	21.8785	21.0241
森林	7.1137	7.1156	7.4638	7.7862	6.9529	6.9515
灌木林	0.0003	0.0003	0.0003	0.0002	0.0003	0.0003
草地	207.8500	210.2589	206.8798	205.1508	209.6714	209.8286
水体	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
裸土地	301.4156	301.4434	301.4156	301.4434	301.4156	301.4434
建设用地	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
湿地	0.0069	0.0069	0.0069	0.0074	0.0069	0.0069
总计	540.1930	540.4474	540.3203	539.9718	539.9257	539.2548

增长，人们更注重对城区基础设施的建设，使得市区内大量地类转化为建设用地，因而碳储量呈现减少趋势。

3 讨论

碳储量的变化主要是由于区域土地覆盖变化所导致的，近年来，随着人口持续增长和社会经济的快速发展[45-46]，使得建设用地面积不断扩张，草地和裸土地被大肆侵占，这也是吐哈盆地生态系统碳储量减少的主要原因。因此，对于高碳储量的地类，如森林、耕地、草地应当实施重点保护，防止其向其他地类转换，减少生态系统碳储量的流失。

研究借助InVEST模型的碳储量模块，估算了吐哈盆地的碳储量及空间分布情况。然而，使用InVEST模型估计碳储量存在一定的不确定性。第一，碳密度是输入模型的重要参数之一，也是准确估计碳储量关键因素[47]。本文碳密度数据的获取主要参考前人研究成果，通过选取与研究区域相似或相近的研究结果，并采用气温、降水量与碳密度的关系模型修正得到，相比于直接采用全国范围数据计算，精度更高。第二，该模型假设碳密度数据在不同的时间尺度上是一致的，这忽视了土地利用内部结构以及不同植被类型的固碳差异[48]，使用恒定的碳密度计算碳储量会产生一定的误差，导致结果的不确定性。今后应针对研究区不同土地覆盖类型的碳密度进行连续观测，以进一步提升碳储量的估计精度。第三，研究中土地利用数据来源于中国年度土地覆盖数据集，然而受制于数据分辨率，仅将数据划分为8类。未来可以获取更高精度的遥感数据，并根据2级土地覆盖类型进行细化，确定细化后研究区各土地覆盖类型碳密度，从而更加准确的计算研究区碳储量。第四，本文利用PLUS模型模拟了未来3种情景下的土地覆盖情况，然而3种情景无法涵盖所有的发展模式，在未来的研究中应充分考虑区域发展政策，缩小情景模拟与现实发展间的差距。

4 结论

研究以吐哈盆地为例，分析了2000—2020年土地覆盖变化及其对碳储量的影响，并预测了2025、2030年不同发展情景下土地覆盖和碳储量的变化，主要结论如下：

（1）2000—2020年吐哈盆地土地覆盖变化主要表现为草地转向耕地、建设用地和裸土地，裸土地是该区域主要的土地覆盖类型，占总面积的85%以上。

（2）2000、2010年和2020年吐哈盆地平均碳储量分别为26.01 $t\cdot hm^{-2}$，25.68 $t\cdot hm^{-2}$，25.73 $t\cdot hm^{-2}$，总体呈现下降趋势。碳储量空间分布也存在着明显的空间差异，呈现出中值区包围高值区，高值区包围低值区的空间分布特征。

（3）与2020年土地覆盖现状相比，2030年3种情景下裸土地均呈现出减少的趋势，而建设用地呈现增加的趋势。可持续发展情景和经济优先发展情景下耕地面积持续减少，草地面积不断增加；在维持现状情景和经济优先发展情景下建设用地面积快速扩张，较2020年分别增加 11.47×10^3 hm^2、12.50×10^3 hm^2。

（4）2025、2030年可持续发展情景下吐哈盆地碳储量呈现先减少后增加的趋势，维持现状发展情景下呈现先增加后减少的趋势，而经济优先发展情景下呈现出持续减少的趋势。2030年可持续发展情景、维持现状情景、经济优先发展情景下总碳储量分别为 540.45×10^6 t、539.97×10^6 t、539.25×10^6 t，其中经济优先发展情景下碳储量损失最大，约损失 1.01×10^6 t。

参考文献（References）

[1] Ito A, Nishina K, Noda H M. Impacts of future climate change on the carbon budget of northern high-latitude terrestrial ecosystems: An analysis using ISI-MIP data[J]. Polar Science, 2016, 10(3): 346-355.

[2] Yue C, Ciais P, Houghton R A, et al. Contribution of land use to the interannual variability of the land carbon cycle[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 3170, doi: 10.1038/s41467-020-16953-8.

[3] Winkler K, Fuchs R, Rounsevell M, et al. Global land use changes are four times greater than previously estimated[J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 2501, doi: 10.1038/s41467-021-22702-2.

[4] 付超, 于贵瑞, 方华军, 等. 中国区域土地利用/覆被变化对陆地碳收支的影响[J]. 地理科学进展, 2012, 31(1): 88-96. [Fu Chao, Yu Guirui, Fang Huajun, et al. Effects of land use and cover change on terrestrial carbon balance of China[J]. Progress in Geography, 2012, 31(1): 88-96.]

[5] 陈耀亮, 罗格平, 叶辉, 等. 1975—2005年中亚土地利用/覆被变化对森林生态系统碳储量的影响[J]. 自然资源学报, 2015, 30

(3): 397-408. [Chen Yaoliang, Luo Geping, Ye Hui, et al. Sources and sinks of carbon caused by forest land use change from 1975 to 2005 in Central Asia[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30 (3): 397-408.]

[6] Ni J. Carbon storage in Chinese terrestrial ecosystems: Approaching a more accurate estimate[J]. Climatic Change, 2013, 119(3): 905-917.

[7] 陈广生, 田汉勤. 土地利用/覆盖变化对陆地生态系统碳循环的影响[J]. 植物生态学报, 2007, 31(2): 189-204. [Chen Guangsheng, Tian Hanqin. Land use/cover change effects on carbon cycling in terrestial ecosystems[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2007, 31(2): 189-204.]

[8] 王秀兰, 包玉海. 土地利用动态变化研究方法探讨[J]. 地理科学进展, 1999, 18(1): 83-89. [Wang Xiulan, Bao Yuhai. Study on the methods of land use dynamic change research[J]. Progress in Geography, 1999, 18(1): 83-89.]

[9] 张晓娟, 周启刚, 王兆林, 等. 基于MCE-CA-Markov的三峡库区土地利用演变模拟及预测[J]. 农业工程学报, 2017, 33(19): 268-277. [Zhang Xiaojuan, Zhou Qigang, Wang Zhaolin, et al. Simulation and prediction of land use change in Three Gorges Reservoir Area based on MCE-CA-Markov[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(19): 268-277.]

[10] Ding Q, Chen Y, Bu L, et al. Multi-scenario analysis of habitat quality in the Yellow River delta by coupling FLUS with InVEST model[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(5): 2389, doi: 10.3390/ijerph18052389.

[11] 张燕, 师学义, 唐倩. 不同土地利用情景下汾河上游地区碳储量评估[J]. 生态学报, 2021, 41(1): 360-373. [Zhang Yan, Shi Xueyi, Tang Qian. Carbon storage assessment in the upper reaches of the Fenhe River under different land use scenarios[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(1): 360-373.]

[12] Liang X, Guan Q, Clarke K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2021, 85: 101569, doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2020.101569.

[13] 史名杰, 武红旗, 贾宏涛, 等. 基于MCE-CA-Markov和InVEST模型的伊犁谷地碳储量时空演变及预测[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(6): 1010-1019. [Shi Mingjie, Wu Hongqi, Jia Hongtao, et al. Temporal and spatial evolution and prediction of carbon stocks in Yili Valley based on MCE-CA-Markov and InVEST models[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021, 38(6): 1010-1019.]

[14] 杨朔, 苏昊, 赵国平. 基于PLUS模型的城市生态系统服务价值多情景模拟——以汉中市为例[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(10): 86-95. [Yang Shuo, Su Hao, Zhao Guoping. Multi-scenario simulation of urban ecosystem service value based on PLUS model: A case study of Hanzhong City[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(10): 86-95.]

[15] Fang J, Yu G, Liu L, et al. Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018, 115(16): 4015-4020.

[16] Nyamari N, Cabral P. Impact of land cover changes on carbon stock trends in Kenya for spatial implementation of REDD+ policy [J]. Applied Geography, 2021, 133: 102479, doi: 10.1016/j.apgeog.2021.102479.

[17] 虎帅, 张学儒, 官冬杰. 基于InVEST模型重庆市建设用地扩张的碳储量变化分析[J]. 水土保持研究, 2018, 25(3): 323-331. [Hu Shuai, Zhang Xueru, Guan Dongjie. Analysis on carbon storage change of construction land expansion in Chongqing based on InVEST model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(3): 323-331.]

[18] Wang N, Chen X, Zhang Z. Spatiotemporal dynamics and driving factors of county-level carbon storage in the Loess Plateau: A case study in Qingcheng County, China[J]. Ecological Indicators, 2022, 144: 109460, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.109460.

[19] Li K, Cao J, Adamowski J F. Assessing the effects of ecological engineering on spatiotemporal dynamics of carbon storage from 2000 to 2016 in the Loess Plateau area using the InVEST model: A case study in Huining County, China[J]. Environmental Development, 2021, 39: 100641, doi: 10.1016/j.envdev.2021.100641.

[20] Zhu X, Li J, Cheng H. Assessing the impacts of ecological governance on carbon storage in an urban coal mining subsidence area [J]. Ecological Informatics, 2022, 72: 101901, doi: 10.1016/j.ecoinf.2022.101901.

[21] 姚楠, 刘广全, 姚顺波, 等. 基于InVEST模型的黄土丘陵沟壑区退耕还林还草工程对生态系统碳储量的影响评估[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 329-336. [Yao Nan, Liu Guangquan, Yao Shunbo, et al. Evaluating on effect of conversion from farmland to forest and grassland porject on ecosystem carbon storage in Loess Hilly-gully Region based on InVEST model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 329-336.]

[22] 段璇瑜, 龚文峰, 孙雨欣, 等. 海南岛海岸带土地利用变化及其对碳储量时空演变的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 301-311. [Duan Xuanyu, Gong Wenfeng, Sun Yuxin, et al. Land use change and its impact on temporal and spatial evolution of carbon storage in coastal zone of Hainan Island[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 301-311.]

[23] 刘洋, 张军, 周冬梅, 等. 基于InVEST模型的疏勒河流域碳储量时空变化研究[J]. 生态学报, 2021, 41(10): 4052-4065. [Liu Yang, Zhang Jun, Zhou Dongmei, et al. Temporal and spatial variation of carbon storage in the Shule River Basin based on InVEST model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10): 4052-4065.]

[24] 王渊刚, 罗格平, 冯异星, 等. 近50 a玛纳斯河流域土地利用/覆被变化对碳储量的影响[J]. 自然资源学报, 2013, 28(6): 994-1006. [Wang Yuangang, Luo Geping, Feng Yixing, et al. Effects of land use/land cover change on carbon storage in Manas River Watershed over the past 50 years[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(6): 994-1006.]

[25] Zhu G, Qiu D, Zhang Z, et al. Land-use changes lead to a decrease in carbon storage in arid region, China[J]. Ecological Indicators, 2021, 127: 107770, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107770.

[26] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907-3925.

[27] Tian L, Tao Y, Fu W, et al. Dynamic simulation of land use/cover change and assessment of forest ecosystem carbon storage under climate change scenarios in Guangdong Province, China[J]. Remote Sensing, 2022, 14(10): 2330, doi: 10.3390/rs14102330.

[28] 蒋小芳, 段翰晨, 廖杰, 等. 基于PLUS-SD耦合模型的黑河流域中游甘临高地区土地利用研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(4): 1246-1258. [Jiang Xiaofang, Duan Hanchen, Liao Jie, et al. Land use in the Gan-Lin-Gao region of middle reaches of Heihe River Basin based on a PLUS-SD coupling model[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(4): 1246-1258.]

[29] Yang X, Bai Y, Che L, et al. Incorporating ecological constraints into urban growth boundaries: A case study of ecologically fragile areas in the upper Yellow River[J]. Ecological Indicators, 2021, 124: 107436, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107436.

[30] 张徐, 李云霞, 吕春娟, 等. 基于InVEST模型的生态系统服务功能应用研究进展[J]. 生态科学, 2022, 41(1): 237-242. [Zhang Xu, Li Yunxia, Lü Chunjuan, et al. Research progress on application of ecosystem service functions based on InVEST model[J]. Ecological Science, 2022, 41(1): 237-242.]

[31] Liu D, Chen J, Ouyang Z. Responses of landscape structure to the ecological restoration programs in the farming-pastoral ecotone of northern China[J]. Science of the Total Environment, 2020, 710: 136311, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136311.

[32] 王子尧, 黄楚梨, 李倞, 等. 耦合InVEST-HFI-PLUS模型的生态分区规划与动态评估——以博尔塔拉蒙古自治州为例[J]. 生态学报, 2022, 42(14): 5789-5798. [Wang Ziyao, Huang Chuli, Li Liang, et al. Ecological zoning planning and dynamic evaluation coupled with InVEST-HFI-PLUS model: A case study in Bortala Mongolian Autonomous Prefecture[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(14): 5789-5798.]

[33] 揣小伟, 黄贤金, 郑泽庆, 等. 江苏省土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响[J]. 资源科学, 2011, 33(10): 1932-1939. [Chuai Xiaowei, Huang Xianjin, Zheng Zeqing, et al. Land use change and its influence on carbon storage of terrestrial ecosystems in Jiangsu Province[J]. Resources Science, 2011, 33(10): 1932-1939.]

[34] Zhou J, Zhao Y, Huang P, et al. Impacts of ecological restoration projects on the ecosystem carbon storage of inland river basin in arid area, China[J]. Ecological Indicators, 2020, 118: 106803, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106803.

[35] 徐丽, 何念鹏, 于贵瑞. 2010s中国陆地生态系统碳密度数据集[J]. 中国科学数据, 2019, 4(1): 90-96. [Xu Li, He Nianpeng, Yu Guirui. A dataset of carbon density in Chinese terrestrial ecosystems (2010s)[J]. China Scientific Data, 2019, 4(1): 90-96.]

[36] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2003, 33(1): 72-80. [Li Kerang, Wang Shaoqiang, Cao Mingkui. Carbon storage of vegetation and soil in China [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2003, 33(1): 72-80.]

[37] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J]. 土壤学报, 2004, 41(1): 35-43. [Xie Xianli, Sun Bo, Zhou Huizhen, et al. Organic carbon density and storage in soils of China and spatial analysis[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(1): 35-43.]

[38] 韩敏, 徐长春, 隆云霞, 等. 西北干旱区不同土地利用情景下的碳储量及碳源/汇变化模拟与预估[J]. 水土保持通报, 2022, 42(3): 335-344. [Han Min, Xu Changchun, Long Yunxia, et al. Simulation and prediction of changes in carbon storage and carbon source/sink under different land use scenarios in arid region of northwest China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(3): 335-344.]

[39] 如克亚·热合曼, 阿里木江·卡斯木, 希丽娜依·多来提, 等. 天山北坡城市群碳储量时空变化及预测研究[J]. 中国环境科学, 2022, 42(12): 5905-5917. [Reheman Rukeya, Kasimu Alimujiang, Duolat Xilinayi, et al. Temporal and spatial variation and prediction of carbon storage in urban agglomeration on the northern slope of Tianshan Mountains[J]. China Environmental Science, 2022, 42(12): 5905-5917.]

[40] 史常明, 柳洋, 张富荣, 等. 焉耆盆地绿洲农田不同类型土壤有机碳空间分布特征及储量估算[J]. 干旱区研究, 2021, 38(3): 672-681. [Shi Changming, Liu Yang, Zhang Furong, et al. Soil organic carbon spatial distribution and reserve estimation of different soil types in Yanqi Basin oasis area[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(3): 672-681.]

[41] Alam S A, Starr M. Biomass and soil carbon stocks of Sudanese Acacia savanna woodland[J]. Journal of Arid Environments, 2013, 89: 67-76.

[42] 张锦, 张新艳, 张文广, 等. 不同情景下松花江上游碳储量动态变化及碳汇潜力[J/OL]. 生态学杂志: 1-14[2024-02-04]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.q.20230621.1841.002.html. [Zhang Jin, Zhang Xinyan, Zhang Wenguang, et al. Carbon stock dynamics and carbon sink potential in the upper reaches of Songhua River under different scenarios[J]. Chinese Journal of Ecology: 1-14[2024-02-04]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.q.20230621. 1841.002.html.]

[43] Han C, Zheng J, Guan J, et al. Evaluating and simulating resource and environmental carrying capacity in arid and semiarid regions: A case study of Xinjiang, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 338: 130646, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.130646.

[44] 李安林, 周艳, 唐丽毅, 等. 怒江州土地利用模拟及生态系统服务价值评估——基于PLUS模型的多情景分析[J]. 中国农业资源与区划, 2023, 44(1): 140-149. [Li Anlin, Zhou Yan, Tang Liyi, et al. Land use simulation and ecosystem services values evaluation in Nujiang Prefecture: A multiple-scenario analysis based on PLUS model[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2023, 44(1): 140-149.]

[45] 王瑾杰, 丁建丽, 张子鹏. 基于遥感生态指数的吐哈地区生态环境变化研究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(5): 1591-1603. [Wang Jinjie, Ding Jianli, Zhang Zipeng. Change of ecological environment in Turpan and Hami cities based on remote sensing ecology index [J]. Arid Land Geography, 2022, 45(5): 1591-1603.]

[46] 赵爽, 丁建丽, 韩礼敬, 等. 新疆典型盐渍土微波介电特性响应分析与建模[J]. 干旱区地理, 2022, 45(5): 1534-1546. [Zhao Sh-

uang, Ding Jianli, Han Lijing, et al. Response analysis and modeling of microwave dielectric properties of typical saline soil in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(5): 1534−1546.]

[47] 雒舒琪, 胡晓萌, 孙媛, 等. 耦合PLUS-InVEST模型的多情景土地利用变化及其对碳储量影响[J]. 中国生态农业学报, 2023, 31(2): 300−314. [Luo Shuqi, Hu Xiaomeng, Sun Yuan, et al. Multi-scenario land use change and its impact on carbon storage based on coupled PLUS-InVEST model[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(2): 300−314.]

[48] 王超越, 郭先华, 郭莉, 等. 基于FLUS-InVEST的西北地区土地利用变化及其对碳储量的影响——以呼包鄂榆城市群为例[J]. 生态环境学报, 2022, 31(8): 1667−1679. [Wang Chaoyue, Guo Xianhua, Guo Li, et al. Land use change and its impact on carbon storage in northwest China based on FLUS-InVEST: A case study of Hu-Bao-Er-Yu urban agglomeration[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(8): 1667−1679.]

Spatiotemporal variation and multiscenario simulation of carbon storage in terrestrial ecosystems in the Turpan-Hami Basin based on PLUS-InVEST model

HAN Chuqiao[1], ZHENG Jianghua[1,2], WANG Zhe[1], YU Wenjie[1]

(1. College of Geography and Remote Sensing Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830017, Xinjiang, China;
2. Xinjiang Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830017, Xinjiang, China)

Abstract: Land cover variations can change regional carbon storage capacity, thereby affecting global climate change. Investigating the impact of land cover changes on carbon stocks and predicting the carbon stocks under different land cover scenarios are crucial in the future for achieving the regional strategic goal of "carbon neutrality". However, ecologically fragile (such as land degradation and desertification) areas in western China remain to be explored. This study selected the Turpan-Hami Basin in Xinjiang as the study area based on the land cover product data, PLUS model, and InVEST model. Furthermore, this paper discusses the spatiotemporal relationship between land cover changes and regional carbon storage and predicts and evaluates their spatiotemporal dynamic characteristics under sustainable development scenarios, maintaining the status quo development scenario, and economic priority development scenarios in 2025 and 2030. The results showed that: (1) In the last 20 years, the Turpan-Hami Basin has the most significant increase in cultivated land and bare land areas among its various land use types, followed by construction land. Conversely, grasslands have exhibited the most notable decreasing trend. Additionally, the conversion of grassland to cultivated and construction lands was the main transfer type. (2) In 2000, 2010, and 2020, the average carbon storage in the Turpan-Hami Basin was 26.01 $t \cdot hm^{-2}$, 25.68 $t \cdot hm^{-2}$, and 25.73 $t \cdot hm^{-2}$, respectively, indicating a trend of first decreasing and then increasing. The cumulative average carbon storage decreased by 0.28 $t \cdot hm^{-2}$, of which the carbon storage of soil organic matter accounted for the highest proportion, approximately 94% of the total carbon storage. Bare land and grassland contributed the most to carbon storage. (3) Under the three scenarios in 2030, no noticeable change was observed in forests, shrubbery, and wetlands; moreover, bare land showed a decreasing trend, while construction land showed an increasing trend in land cover. (4) By 2030, the total carbon storage of Turpan-Hami Basin under the sustainable development scenario increased by 0.18×10^6 t than that in 2020 and decreased by 0.30×10^6 t and 1.01×10^6 t under the status quo development and economic development scenarios, respectively. Among the three scenarios, the carbon storage loss was highest under the economic development scenario. These results provide a basis for land use optimization and sustainable ecosystem development measures in the Turpan-Hami Basin.

Key words: land cover change; scenario simulation; carbon storage; Turpan-Hami Basin